



Thomson - CSF

## Les tubes et dispositifs de prise de vue à cible silicium

### Résumé

Description et analyse de l'utilisation du silicium monocristallin dans les dispositifs de prise de vue de télévision.

Dans le cas des tubes, elle nécessite la réalisation d'une multitude de diodes discrètes séparées par un isolant. Cette structure entraîne un fonctionnement différent de celui des cibles classiques pour la génération du signal vidéo.

L'utilisation des cibles silicium à mosaïque de diodes permet d'une part une excellente détection photonique (vidicon), et d'autre part, une multiplication importante d'électrons qui permet la réalisation de tubes à grande sensibilité (Nocticon).

Les technologies mises en œuvre et le concept du transfert de charges de proche en proche laissent espérer des développements importants dans le domaine des dispositifs de prise de vue entièrement solides. Les différentes solutions technologiques et les performances attendues de ces dispositifs sont analysées.

### 1. Introduction

Les performances des senseurs d'image utilisés en prise de vue de télévision dépendent en premier lieu de l'élément de détection utilisé. Cet élément de détection qui convertit les photons absorbés en charges électriques peut être un photoconducteur (Vidicon, Plumbicon) ou un photo-émetteur (Image orthicon, Esicon, Nocticon...).

Les tubes du type photoconducteur sont, à l'heure actuelle, les plus largement utilisés, du fait de leur faible encombrement et simplicité de fonctionnement.

Quoiqu'il existe un grand nombre de matériaux photoconducteurs, très peu satisfont aux exigences spécifiques souvent contradictoires imposées par leur utilisation en tant que cible de Vidicon. Seuls le trisulfure d'antimoine et l'oxyde de plomb ont été largement utilisés, dans des conditions très strictes de pureté et de dépôt, en couches minces polycristallines pour constituer des cibles de tube de prise de vue.

Les progrès réalisés dans l'obtention de matériaux semiconducteurs monocristallins parfaitement contrôlés, et l'apparition de photodétecteurs élémentaires de qualité ont permis d'envisager leur utilisation pour les tubes de prise de vue. De prime abord, leur résistivité volumique, même sous forme intrinsèque est de plusieurs ordres de grandeur trop faible pour l'obtention d'un faible courant d'obscurité et d'un pouvoir de résolution satisfaisant. La constitution d'un réseau de diodes  $p-n$  polarisées en inverse et isolées les unes des autres permet d'éviter cet écueil et aboutit

à une structure en mosaïque qui curieusement est à rapprocher de celle des cibles du premier tube de prise de vue : l'Iconoscope.

Quoique le principe de cibles à mosaïque de diodes soit connu depuis longtemps le fait d'utiliser le silicium comme matériau photodétecteur présente des avantages certains réf. 1 qui sont essentiellement : un rendement quantique élevé du fait de son coefficient d'absorption de lumière, une sensibilité étendue dans le spectre visible — 350 à 1 100 nm — (en corrélation avec la largeur de bande interdite 1,15 eV), une bonne linéarité en fonction de l'éclairement et une grande rapidité de réponse.

Par ailleurs, les caractéristiques de courant inverse de diode et de capacité sont compatibles de principe avec le fonctionnement en accumulation de charge pour des périodes d'image de l'ordre de 40 ms.

L'utilisation de mosaïques à haute résolution dans les Vidicons, rendue possible par l'évolution des technologies de réalisation des circuits intégrés, aboutit à un élément hybride, qui n'est sans doute qu'une étape vers la réalisation de senseurs d'image à l'état solide, dont les premières réalisations sont apparues au niveau du laboratoire.

Par ailleurs, le grand gain de multiplication pour des électrons d'énergie 10 keV permet de constituer des tubes ultra sensibles pour la télévision à très bas niveau de lumière.

Une première partie de cette note est consacrée à l'exposé des caractéristiques des tubes Vidicon à cible de silicium dont l'usage se développe en téléphonovision et en TV industrielle et aux Tubes Nocticon incorporant une cible similaire dont l'usage est réservé essentiellement à la Télévision nocturne ou à bas niveau de lumière.

Une seconde partie est consacrée aux caractéristiques que l'on peut prévoir pour les senseurs solides dont l'usage se développera dans la prochaine décennie.

### 2. Tubes de prise de vue

#### 2.1. Cibles à mosaïque de diodes silicium pour Vidicon

Les cibles utilisées dans les Vidicons sont constituées par une plaquette de silicium d'orientation (111) ou (100) et de type  $n$  avec un taux d'impuretés de  $5 \cdot 10^{14}$  atomes/cm<sup>3</sup>. Leur épaisseur est de l'ordre de 20  $\mu\text{m}$ .

La face plane comporte un arrangement régulier de région p discrètes réalisées par diffusion et séparées par un isolant qui se trouve être naturellement de la silice.

Le nombre de diodes par  $\text{cm}^2$  utile conditionne le pouvoir de résolution. Pour un Vidicon de 26 mm, de surface utile  $9,5 \times 12,7 \text{ mm}^2$ , un pouvoir de résolution de 600 lignes entraîne un nombre minimum de diodes de l'ordre de  $5 \cdot 10^6$ . Par ailleurs, la surface totale des diodes détermine la capacité de cible ; la figure 1 montre la constitution d'une telle cible. Sa

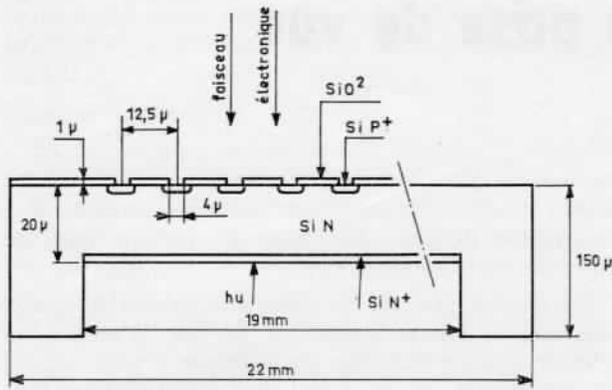


FIG. 1. — Schéma d'une cible à mosaïque de diodes.

réalisation utilise les technologies planar mises en œuvre pour les circuits intégrés.

Elle présente malgré tout un impératif supplémentaire : le taux de défauts tolérés est très faible ( $10^{-5}$ ) et la périodicité des diodes doit être parfaite pour éviter des effets parasites auxquels l'œil est extrêmement sensible.

## 2.2. Principe de fonctionnement des cibles de Vidicon

Le fonctionnement de ces cibles est basé sur l'absorption de l'énergie lumineuse, la création de paires électrons-trous et l'accumulation des trous dans les jonctions des diodes polarisées en inverse du fait de l'application d'un potentiel sur le substrat et du balayage par faisceau d'électrons (fig. 2).

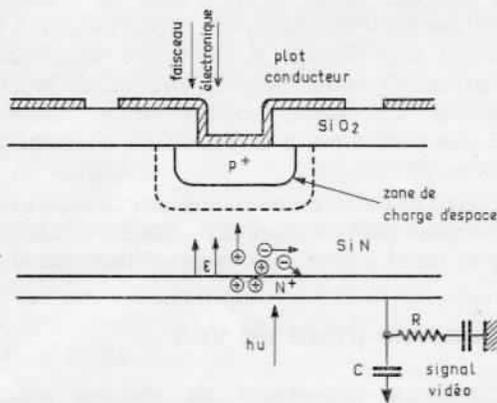


FIG. 2. — Fonctionnement d'une cible mosaïque silicium.

Sur la face éclairée, les photons incidents sont absorbés sur une profondeur qui est de l'ordre de  $0,1 \mu\text{m}$  à  $400 \text{ nm}$  et de  $10 \mu\text{m}$  à  $800 \text{ nm}$ . La figure 3

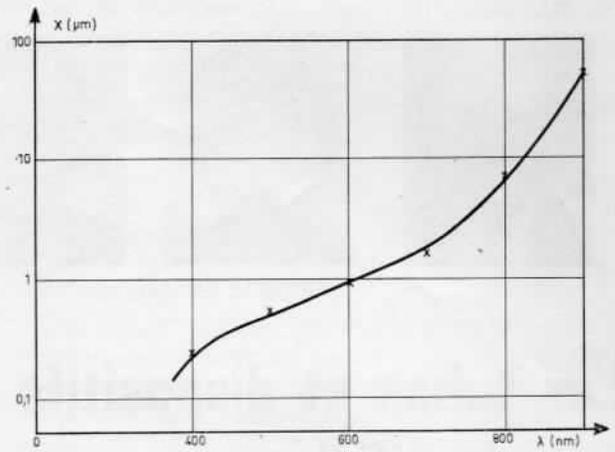


FIG. 3. — Variation de la profondeur d'absorption avec la longueur d'onde.

montre la variation d'absorption pour le silicium dans le spectre visible et le proche infrarouge.

Les photons bleus sont donc absorbés très près de la surface, et, de ce fait, les porteurs de charges qu'ils créent ont une forte probabilité de se recombiner, diminuant d'autant la sensibilité du dispositif pour ce rayonnement. Pour y remédier, une couche diffusée n+ est réalisée en surface ; elle y crée un gradient de concentration de charges, donc un champ électrique. Les trous engendrés dans cette zone sont soumis à ce champ et éloignés de la surface ; ils peuvent donc diffuser vers les zones p+. L'optimisation de cette diffusion permet ainsi d'obtenir une bonne réponse spectrale pour les faibles longueurs d'onde.

Les photons absorbés engendrent des paires électrons-trous ; les trous constituent les porteurs minoritaires qui diffusent dans la zone non soumise à un champ électrique.

Pour une cible d'épaisseur  $20 \mu\text{m}$ , la recombinaison des porteurs minoritaires dans le volume du silicium est négligeable. Ils diffusent jusque dans la zone de charge d'espace des diodes p+ où ils sont aussitôt collectés sous l'effet du champ électrique existant. Les trous collectés déchargent les diodes dont le potentiel remonte à une valeur intermédiaire entre 0 et 10 V. Le passage du faisceau électronique recharge ces diodes au potentiel 0 et le courant de déplacement qui en résulte constitue le signal vidéo. Ce signal est proportionnel au nombre de trous collectés, donc à l'intensité lumineuse incidente.

Un tel dispositif ne fonctionne en fait qu'imparfaitement ; le faisceau électronique charge l'oxyde d'isolement, créant une barrière de potentiel qui empêche le faisceau d'atteindre les diodes (fig. 4a). Deux solutions ont été envisagées pour éliminer ce phénomène :

— évaporation d'une couche résistive sur toute la surface de la cible permettant aux charges de s'écouler vers chaque diode. Cette couche doit avoir une résistance superficielle  $R = 10^{13} \Omega/\square$  (fig. 4b) [2] ;

— dépôt d'une couche conductrice gravée de façon à constituer au-dessus de chaque diode une électrode conductrice la plus grande possible (fig. 4c).

Cette seconde solution semble préférable malgré les difficultés technologiques. En effet, la résistivité de couches semi-conductrices dépend de la tempéra-

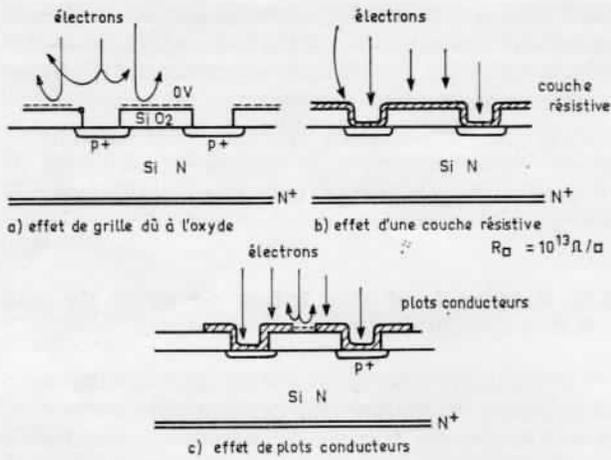


FIG. 4. — Conditions d'atterrissage des électrons.

ture ; le pouvoir de résolution décroît avec celle-ci. D'autre part, la capacité en série avec celle des diodes contribue à augmenter la rémanence. Les cibles à mosaïque de diodes ont été développées en vue de leur incorporation dans des structures du type Vidicon. Comme pour toutes les cibles utilisées, les effets des paramètres de conception sur les caractéristiques (réponse spectrale, résolution, rémanence, défauts d'aspect...) sont très imbriqués et rendent l'analyse complexe.

### 2.3. Caractéristiques des Vidicons et Nocticons

#### 2.3.1. Caractéristiques d'obscurité

Dans l'obscurité, les capacités élémentaires se déchargent lentement. Le courant de fuite dit « courant d'obscurité » est dû à la génération thermique de porteurs dans la zone de charge d'espace ou à l'interface silice-silicium [3, 4].

La figure 5 donne la variation du courant d'obscurité  $i_0$  mesuré à 25 °C en fonction de la tension appliquée  $V_c$ .

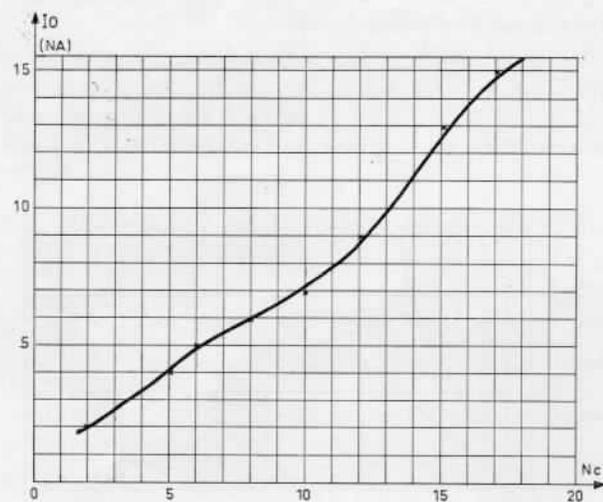


FIG. 5. — Variation du courant d'obscurité en fonction de la tension de cible.

Ce courant  $i_0$  varie avec la température et double quand  $T$  augmente de 10 °C. Afin d'éviter de stabiliser électroniquement le niveau de noir en fonction de la température, il faut minimiser ce courant de fuite

par le choix d'une technologie de cible appropriée. On obtient ainsi un courant d'obscurité à 25 °C de l'ordre de 5 à 10 nA/cm<sup>-2</sup>.

#### 2.3.2. Sensibilité et réponse spectrale

La figure 6 représente la sensibilité en fonction de l'éclairement (pour un standard TV 25 images/s). Avec une source à 2 854 °K, une sensibilité de 4 000 μA/lm ou 500 nA/lux pour le TH 9820 est atteinte. Il convient toutefois de remarquer qu'une part importante du courant de signal est due à la partie rouge et proche infrarouge du spectre. L'interposition d'un filtre absorbant l'infrarouge limite cette sensibilité à 125 nA/lux pour le spectre visible. Cette sensibilité dans le proche IR correspondant à un seuil supérieur à 1 000 nm peut être mise à profit pour certaines applications.

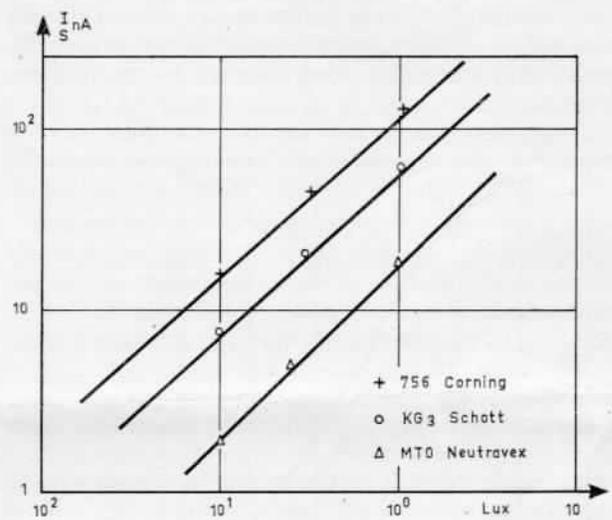


FIG. 6. — Courbes caractéristiques signal éclaircissement (TH 9820).

Le courant de signal maximal est de 600 nA et le courant typique de 350 nA. Il varie proportionnellement à l'éclairement (gamma unitaire).

La figure 7 représente la courbe de réponse spectrale du tube TH 9820, ainsi que celle d'un Vidicon standard TH 9808 à cible en trisulfure d'antimoine.

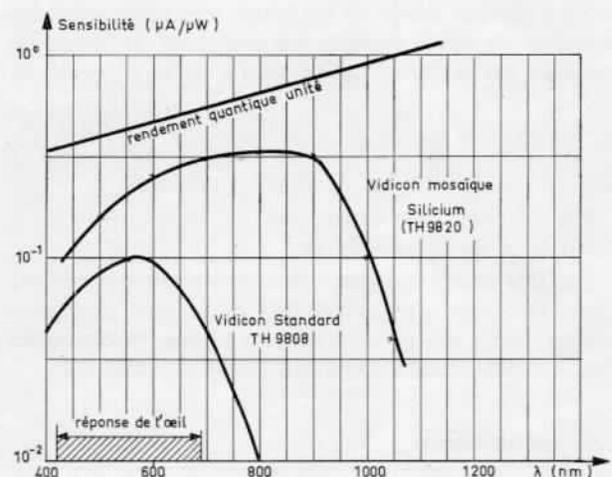


FIG. 7. — Courbes de réponse spectrale (TH 9820).

### 2.3.3. Pouvoir de résolution

Le pouvoir de résolution des cibles en silicium est limité par la diffusion des trous et par le pas des diodes. La fonction de transfert de modulation de la cible elle-même présente une valeur de 50 % à 15 pl/mm (300 lignes TV) pour une épaisseur de cible de 20  $\mu\text{m}$  ; pour 15  $\mu\text{m}$ , elle atteint 70 %.

En outre, les possibilités de résolution sont dégradées par la dimension finie du faisceau d'électrons et la résistivité de surface est influencée par les conditions d'atterrissage des électrons. La structure à plots conducteurs permet d'éviter la dégradation due à la fuite de surface. Par ailleurs, il existe des conditions d'éclairement et de polarisation électrique où le pouvoir de résolution peut être totalement détruit par court-circuit entre les diodes.

La figure 8 montre la courbe de transfert de modulation pour un tube TH 9820 et un courant de signal crête de 200 nA. Elle révèle une résolution limite de 700 lignes TV, et une modulation de 40 % à 400 lignes TV, comparables aux performances des Vidicons standard de 26 mm, ce qui constitue un niveau de qualité très acceptable pour la majorité des applications.

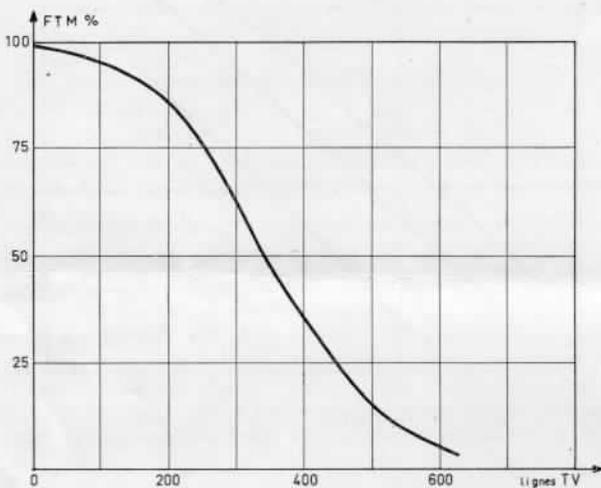


FIG. 8. — Courbe de transfert de modulation (TH 9820).

### 2.3.4. Réponse temporelle - réponse aux éclaircissements intenses

Le retard à l'établissement ou à l'extinction du signal, appelé rémanence, a une origine purement capacitive ; le faisceau d'électrons doit en effet recharger chaque diode en un temps très court avec des électrons de faible énergie. La constante de temps de recharge est largement dépendante de la capacité de cible.

La rémanence, pour un courant de signal de 100 nA, est de l'ordre de 10 %. Elle décroît rapidement à mesure que le courant de signal augmente.

Par ailleurs, il n'existe pas de signal résiduel à persistance de longue durée.

La cible soumise à des éclaircissements intenses revient à son équilibre sans détérioration, de plus ou moins longue durée, des caractéristiques photo-électroniques (brûlure, marquage, rétention photographique).

### 2.4. Conclusion

Les diverses performances des Vidicons à cible silicium sont donc bonnes ou excellentes. La grande

sensibilité, en particulier dans le rouge, la grande robustesse permettent d'aborder les applications TV les plus diverses en utilisant les caméras à Vidicons classiques légèrement modifiés.

Pour des applications spéciales, des circuits de correction de gamma, de commande automatique de lumière ou de gain peuvent constituer un atout supplémentaire.

### 2.5. Applications aux tubes de prise de vue à bas niveau de lumière (Nocticon)

Le fonctionnement de la cible est basé sur la création de porteurs de charge, leur accumulation capacitive, et leur lecture par faisceau d'électrons. La création de ces charges, due à l'absorption de photons dans le cas du Vidicon peut être réalisée par des modes différents d'apport d'énergie. Elle est également possible par bombardement du silicium par des électrons d'énergie suffisante.

Un quantum de 3,5 eV est nécessaire pour l'ionisation et la création d'une paire électron-trou.

Ainsi pour des électrons de 10 keV un gain d'environ 2 700 peut être obtenu. Ce principe peut être mis à profit pour la multiplication des charges accumulées et donc du signal ; il est utilisé dans les tubes du type Nocticon (\*) (autres dénominations EBS, SIT...) comportant une photocathode, une optique électronique de transfert et d'accélération des photoélectrons sur la cible mosaïque et un canon à électrons du type Vidicon pour la génération du signal par balayage.

Une sensibilité de 400 mA/lumen peut ainsi être atteinte ; elle permet d'obtenir avec un champ utile de 25 mm des images pour des niveaux d'éclairement de scène aussi bas que  $10^{-3}$  à  $10^{-4}$  lux qui sont ceux rencontrés par des nuits très obscures.

Le fonctionnement électrique est par ailleurs analogue à celui d'un Vidicon et les caractéristiques de rémanence, courant d'obscurité sont identiques.

La variation du gain de cible par ajustement de la tension d'accélération des photoélectrons entraîne une variation de la sensibilité ; on peut atteindre une dynamique de l'ordre de  $10^5$ .

Ce tube constitue une excellente solution pour la télévision à faible niveau de lumière, permettant une très bonne détectivité ; la figure 9 montre le pouvoir de résolution en fonction de l'éclairement. L'adjonc-

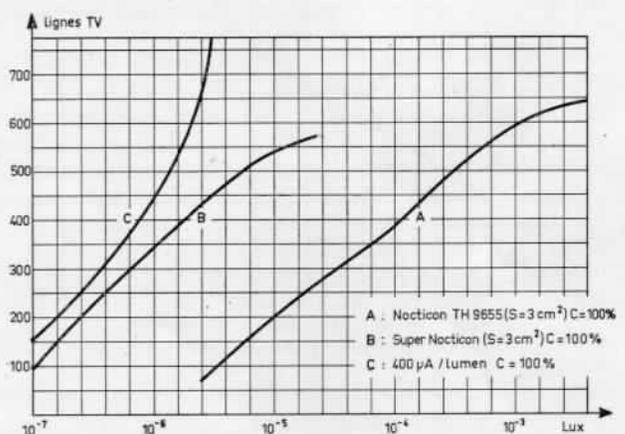


FIG. 9. — Courbes de détectivité : Nocticon et super Nocticon.

(\*) Marque déposée.

tion d'un intensificateur d'image du type TH 9473 accroît encore cette détectivité (super Nocticon, courbe B) elle permet la prise de vue à très bas niveau de lumière et est à comparer à celle d'un détecteur idéal de même sensibilité de photocathode (courbe C). Les qualités que présente ce tube et notamment sa grande résistance aux suréclaircissements, permettent la conception de caméras de télévision réellement opérationnelles.

### 3. Les senseurs d'image solides

Les senseurs d'images solides ont fait l'objet de recherches et de développements depuis plus de 15 ans, notamment sous la forme de films minces associés à des matrices de conducteurs  $xy$  permettant l'adressage et l'extraction du signal. La complexité d'intégration des éléments détecteurs et des capacités de stockage n'ont pas permis la réalisation de matrices opérationnelles à grand nombre d'éléments. Les dispositifs à transfert de charge (DTC) nouvellement imaginés, réalisés sur substrat de silicium constituent une approche nouvelle au problème de la prise de vue par senseur solide. Les qualités de détection du silicium et la maîtrise des technologies planar, peuvent permettre de concevoir un dispositif de prise de vue de fabrication relativement simple.

Le principe de ces dispositifs est de stocker des charges sur les éléments discrets d'un semiconducteur, selon une image électrique correspondant à l'image optique, et de transférer ces charges de proche en proche jusqu'à une porte unique amplificatrice délivrant le signal vidéo. De nombreuses structures sont possibles ; on peut les classer en deux groupes principaux :

- les dispositifs utilisant le couplage direct des charges ou CCD (charge coupled devices) initialement décrit par BOGLE et SMITH [5],

- les dispositifs utilisant les transistors MOS pour le transfert de charges de capacité à capacité, décrits par SANGSTER et TEER, ou BBD (bucket brigade devices) [6].

L'application de ces dispositifs à la prise de vue peut être envisagée sérieusement dans les années futures ; elle entraînera des changements techniques non seulement du senseur d'image mais également des circuits associés pour l'exploitation optimale du signal.

#### 3.1. Description et fonctionnement du CCD (à 3 phases et 2 phases)

La structure CCD la plus simple utilise un signal de commutation en trois phases qui adresse une cellule unitaire à trois électrodes adjacentes. La figure 10 représente une vue du dispositif.

Sur du silicium oxydé, est déposé un réseau linéaire d'électrodes reliées de trois en trois par des contacts sur lesquels on adresse les signaux de commutation.

Le fonctionnement est le suivant : des charges engendrées par la photodétection sont stockées sous les électrodes reliées à la phase  $\phi_1$  maintenue à un potentiel négatif, les phases  $\phi_2$  et  $\phi_3$  étant au potentiel nul.

Dans un deuxième temps, on effectue le transfert des charges stockées : on commute la phase  $\phi_2$  à un potentiel plus négatif que  $\phi_1$  en créant un champ qui

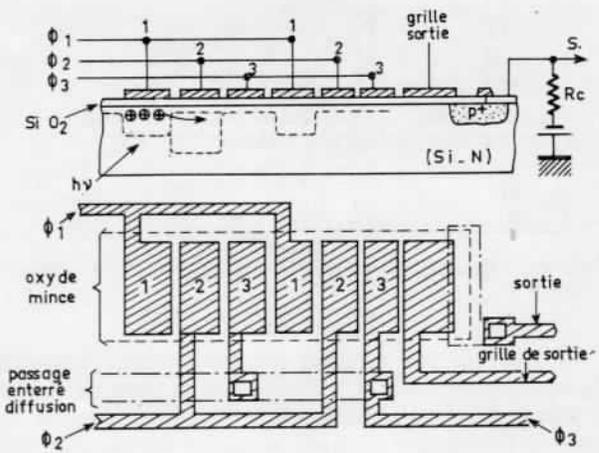


FIG. 10. — Principe du dispositif à transfert de charge, type CCD 3 phases.

déplace les charges de l'électrode 1 vers l'électrode 2, puis ramène  $\phi_1$  au potentiel nul,  $\phi_2$  au potentiel de  $\phi_1$  ; on peut alors commuter  $\phi_3$  à un potentiel plus négatif que  $\phi_2$ . Les charges se déplacent sous l'électrode 3. On ramène  $\phi_2$  à 0,  $\phi_3$  au potentiel de  $\phi_2$  et ainsi de suite. Les charges sont ainsi transférées vers la droite jusqu'à être collectées par un transistor diffusé permettant la sortie du signal.

Différentes améliorations technologiques qui apportent des dissymétries dans la structure permettent de réduire la commande à deux phases. L'idée est de créer une marche de potentiel vers la droite sous chaque électrode. On rend ainsi le transfert unilatéral.

Divers moyens peuvent être employés :

- Une électrode est divisée en deux parties reliées électriquement, enterrée  $M_1$  (stockage) et supérieure  $M_2$  qui repose sur une épaisseur d'oxyde plus importante et crée donc une zone de charge d'espace d'extension moindre (transfert) (figure 11).

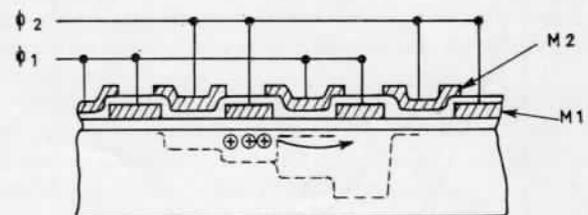


FIG. 11. — Dispositif à transfert de charge type CCD 2 phases à grille enterrée.

- L'oxyde est partagé en deux zones alternées de constantes diélectriques différentes ( $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  par exemple). Les électrodes viennent chevaucher les limites entre oxydes. On obtient ainsi une répartition des potentiels analogue au cas précédent (fig.12).

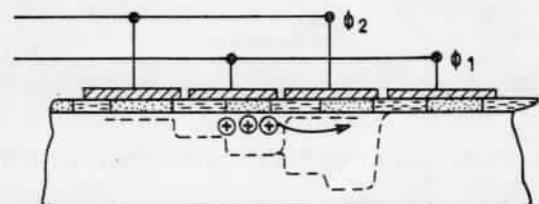


FIG. 12. — Dispositif de transfert de charge type CCD 2 phases à isolant anisotrope.

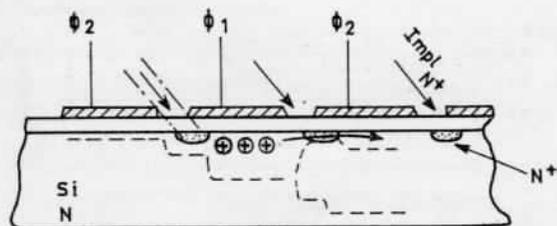


FIG. 13. — Dispositif de transfert de charge type CCD 2 phases à ilots N+.

— On crée des zones N+ sous l'extrémité gauche de chaque électrode. L'extention de la zone de charge d'espace étant plus faible dans les zones dopées, on obtient la configuration de potentiel désirée (fig. 13).

### Caractéristiques du transfert

Le transfert de charge n'est pas instantané et pour un temps donné n'est pas forcément complet.

Deux composantes apparaissent dans le transfert : un courant de diffusion et un courant dû au champ électrique. Le champ est prédominant au début du transfert et conduit à un écoulement rapide du maximum des charges. Puis le courant de diffusion s'impose et épuise plus lentement la charge résiduelle.

Le rendement du transfert dépend de la charge initiale à transmettre, de la largeur de l'électrode, de la mobilité des porteurs. Des rendements de 99,99 % à 1 MHz, et 99,97 % à 20 MHz pour une largeur d'électrode de 10 μ et des signaux importants peuvent être atteints (fig. 14 et [7]). Les signaux faibles sont moins bien transférés que les signaux élevés. Il est à signaler qu'un mauvais transfert se traduit par une détérioration de la résolution d'image et un certain filage.

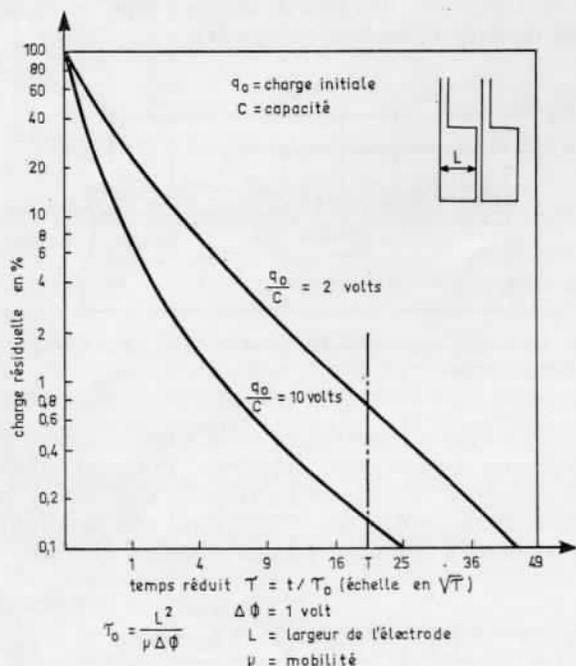


FIG. 14. — Rendement de transfert dans un dispositif type CCD.

### 3.2. Description et fonctionnement du BBD

Le BBD se présente comme une suite de transistors MOS dont chaque grille est couplée au drain correspondant par une capacité C [8]. Dans sa version

intégrée, il est constitué par des diffusions P+ sur substrat N par exemple, régulièrement espacées, recouvertes d'un oxyde mince et d'un réseau d'électrodes reliées de deux en deux (fig. 15). Chaque électrode recouvre presque entièrement la diffusion qui est à droite et se trouve adjacente à la diffusion de gauche. La partie recouverte crée la capacité grille-drain. L'intervalle entre deux diffusions est le canal MOS. Le système est commandé par deux signaux de phases  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$ .

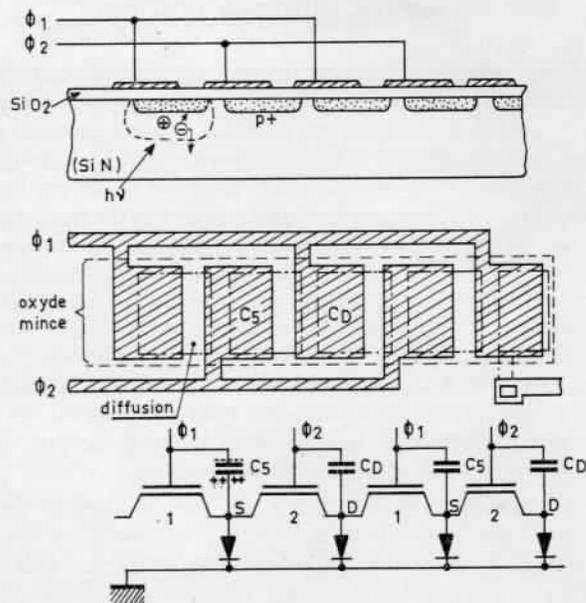


FIG. 15. — Principe du dispositif à transfert de charge type BBD.

Les capacités se chargent à un potentiel de référence. Des signaux optiques ou électriques peuvent modifier localement ce potentiel. On peut alors transférer ces échantillons de signal, de capacité en capacité tout au long de la structure, et les recueillir sur le dernier drain.

On a également accès en parallèle sur les échantillons du signal si on place sur chaque source (ou drain) un dispositif de lecture, à haute impédance pour ne pas perturber le transfert.

Le BBD peut ainsi être utilisé en registre à décalage pour le balayage intégré d'une structure, comme il sera indiqué plus loin. L'entrée de l'impulsion de balayage se fait alors sur la source du premier transistor MOS.

### Caractéristiques du transfert

La figure 16a représente la courbe de décroissance de la charge signal en fonction du temps.

Le transfert est hyperbolique et dépend de la charge signal. Il reste pratiquement toujours sur la source une charge résiduelle qui dépend de plus, de la charge signal.

Le transfert est incomplet et non uniforme pour des signaux analogiques.

Quoi qu'il en soit, des rendements de 99,93 % à  $f = 1 \text{ MHz}$  et 99,7 % à  $f = 5 \text{ MHz}$  sont réalisés actuellement pour les dispositifs BBD [9].

### 3.3. Application du transfert de charge aux dispositifs de prise de vue

Les dispositifs de prise de vue reposent sur le principe que le temps d'accumulation (temps de

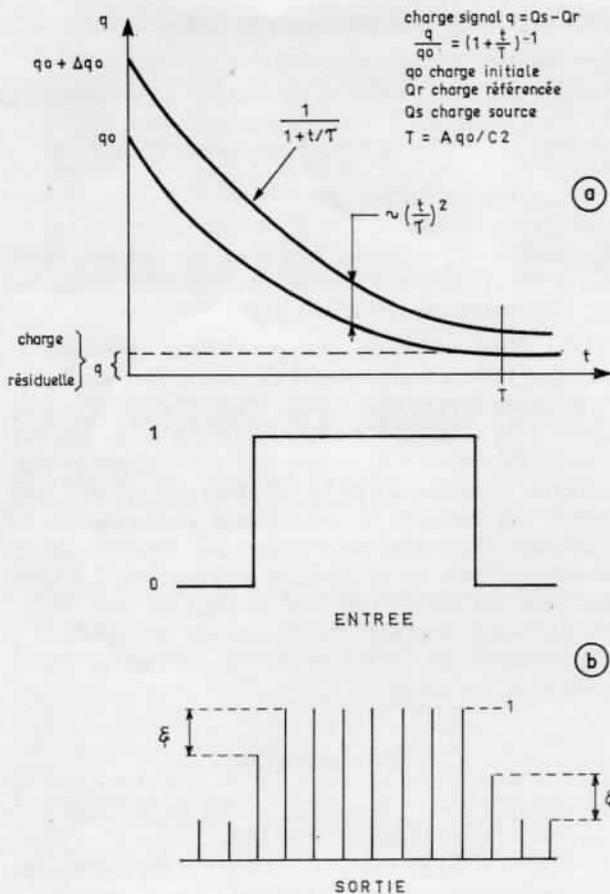


FIG. 16. — Transfert de la charge signal sur dispositif type BBD

formation de l'image électrique sous l'influence de l'image optique) est très supérieur au temps de lecture (temps de transfert des charges le long de la structure). Pendant leur transfert, les charges sont très peu affectées par la présence de la lumière. Le stockage des charges se fait sur les photodiodes des drains dans le cas du BBD, et dans les zones de charge d'espace polarisées en inversion dans le cas du CCD.

Les figure 17 et 18 illustrent deux structures possibles pour l'agencement d'un dispositif de prise de vue.

Le transfert des charges (fig. 17) se fait le long de chaque ligne, lorsque les signaux de commande  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  lui sont adressés successivement par le balayage vertical. Entre temps, les lignes stockent le signal optique. Lorsque les charges parviennent en bout de ligne, elles sont prises en compte par un registre de sortie qui est toujours adressé par  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ . A la sortie de ce registre, le signal est recueilli sur une diffusion unique de faible capacité et amplifié par des éléments

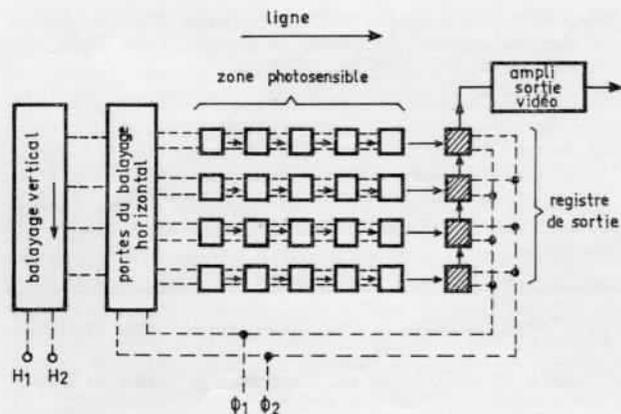


FIG. 17. — Structure de dispositif de prise de vue type 1.

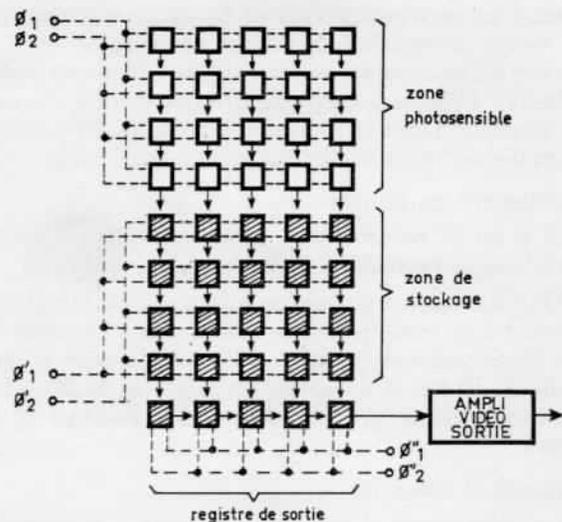


FIG. 18. — Structure de dispositif de prise de vue type 2.

qui peuvent être intégrés. Le registre de balayage vertical est un BBD dont chaque étage commande les portes MOS du balayage horizontal.

Le transfert des charges (fig. 18) se fait le long de chaque colonne simultanément depuis une zone photosensible exposée à l'image optique vers une zone de stockage placée dans l'obscurité (étages en grisé). Pendant que la zone photosensible stocke une nouvelle image, la zone où l'image précédente vient d'être transférée est analysée par une transmission pas à pas de chaque ligne, dans le registre de sortie par laquelle elle est acheminée vers l'amplificateur vidéo et lue comme précédemment.

La première structure nécessite une place moins importante et comporte un nombre de transferts moindre que la seconde. Par contre, cette dernière a l'avantage d'une fréquence de lecture plus basse et n'utilise pas de registre et portes pour le balayage.

Dans l'un et l'autre cas, à cause du registre de sortie, les temps d'extraction des lignes ne sont pas égaux, un retard est introduit par les trajets différents. Il peut être compensé par une adaptation de la fréquence de lecture.

Dans le cas de la figure 17, on pourrait remplacer le registre de sortie par une diffusion unique commune à toutes les lignes, mais on perdrait le bénéfice d'une sortie sur faible capacité.

### Caractéristiques de la prise de vue par transfert de charges

#### Encombrement

Un dispositif agencé selon la figure 17 et de résolution  $600 \times 600$  points sur une surface sensible de  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ , avec une structure 2 phases, nécessite 1 200 éléments unitaires (capacité MOS) dans le sens du transfert. Dans ce cas l'électrode unitaire doit occuper une surface de  $15 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$  ce qui est possible dans le cadre actuel de la technologie. Par contre, un bon rendement de fabrication sur une surface de  $20 \text{ mm}$  au carré est difficile à réaliser, du fait de la complexité technologique. Des dispositifs opérationnels de  $106 \times 128$  intégrés sur une surface de  $27 \text{ mm}^2$  ont été réalisés.

#### Fréquence de lecture

Pour le dispositif précédent utilisé en télévision à  $25 \text{ im./s}$ , on doit transférer une ligne entière (1 200

points) en un temps moyen de 64  $\mu$ s, ce qui nécessite un temps de transfert de l'ordre de 50 ns et une fréquence de commutation de 10 MHz (fréquence vidéo 5 MHz). D'après les caractéristiques théoriques, ceci est possible. Dans la pratique, à de telles fréquences, le rendement de transfert est encore trop faible.

#### Rendement de transfert

Si  $\eta$  est le rendement pour un transfert à  $N$  transferts, le rendement global est  $\eta^N$ .

Une atténuation globale de 3 dB sur 1 200 transferts, conduit à un rendement  $\eta = 0,9997$ . Un tel rendement est théoriquement possible avec une largeur d'électrode de 10  $\mu$ m et une durée de transfert de 200 ns si le substrat est de type N, de 50 ns si le substrat est de type P.

#### Courant d'obscurité

La composante dominante du courant d'obscurité est la génération thermique dans la zone désertée et à l'interface Si-SiO<sub>2</sub>. Pour des dispositifs construits sur du silicium de haute qualité, on peut compter sur des courants de 30 nA/cm<sup>2</sup> au maximum. De tels courants sont capables de saturer un CCD si on laisse les charges se stocker pendant plus de 5 s. Comme le temps d'accumulation est souvent inférieur à 0,5 s le courant d'obscurité est au plus égal à 10 % du signal.

#### Courant de signal

Par comparaison avec la cible du Vidicon on peut escompter une sensibilité en lumière visible de 500  $\mu$ A/lumen. Un courant de signal de 50 nA  $\cdot$  cm<sup>-2</sup> peut être obtenu à 1 lux d'éclairement avec un senseur éclairé par transmission.

#### Bruit

Le bruit associé au signal vidéo est constitué du bruit thermique du préamplificateur, du bruit de grenaille du courant de signal, du bruit cohérent dû à la commutation et d'une composante associée au dispositif de transfert de charge. Par suite de l'intégration possible du préamplificateur au senseur, la capacité d'entrée peut être notablement réduite par rapport à celle des circuits usuels associés aux tubes de prise de vue, rendant ainsi le rapport S/B plus indépendant de la fréquence. Le bruit cohérent de commutation peut être filtré, sa fréquence fondamentale étant le double de la fréquence maximale du signal vidéo.

Sur le plan pratique, les sources de bruit, en addition au courant d'obscurité, d'amplitude réduite aux faibles températures, resteront celles associées à la statistique de transfert, et en particulier aux inégalités de technologie, aux effets de trappe dont les aspects multiples restent à établir.

### 3.4. Conclusion

En conclusion, on peut résumer les avantages potentiels de ce genre de dispositif :

- une sortie sur faible capacité (0,05 pF) conduisant à un signal important et de faible bruit,
- une faible rémanence,

- une faible consommation (5  $\mu$ W/point),
- des dimensions restreintes,
- une analyse discrète de l'image fournissant un signal échantillonné, ce qui présente des avantages pour la couleur et le traitement numérique.

Par contre, avant de pouvoir construire des ensembles importants de 600  $\times$  600 points, un gros effort de technologie est à fournir afin d'atteindre de bons rendements de fabrication et une homogénéité suffisante sur l'ensemble de la surface utile.

Une étude poussée des paramètres affectant le transfert reste à faire, ou est en cours. Des améliorations de structure dans le sens d'une plus grande simplicité sont aussi nécessaires. D'ores et déjà, des dispositifs de 100  $\times$  100 points ont été réalisés et permettent d'envisager dans un avenir relativement proche des caméras de télévision à performances de résolution moyenne, satisfaisant les besoins de la téléphonovision et de diverses applications ; TV industrielle ou de surveillance, lecture de caractères ; des dispositifs linéaires de 500 points ont été décrits et permettent de faire face aux problèmes de transmission de fac simulé.

### Bibliographie

- [1] CROWELL M.H., LABUDA, E.F. — The silicon diode array camera tube *BSTJ*, May-June, 1969.
- [2] BEADLE W.E., SCHORR A.J. — Picture phone silicon target signal analysis *BSTJ*, July-August 1970.
- [3] BUCK T.M., CASEY H.C., DELTON J.V., YAMIN M. — Influence of bulk and surface properties on image sensing silicon diode arrays. *BSTJ*, November 1968.
- [4] GROVE A.S., FITZGERALD D.J. — Surface effect on p n junctions. *Solid state electronics*, vol. 9, pp. 783-806, 1966.
- [5] BOYLE W.S., SMITH G.E. — Charge coupled semiconductor device. *Bell system technical journal*, avril 70, pp. 587-593.
- [6] SANGSTER F.L.J., TEER K. — Bucket brigade Electronics. *IEEE journal of solid state circuits*, vol. SC4 n° 3, juin 1969, pp. 131-136.
- [7] STRAIN R.J., SCHRYER N.L. — A non linear diffusion analysis of charge coupled device transfer. *Bell system technical journal*, vol. 50, n° 6, juillet-août 71, pp. 1721-1740.
- [8] ALTMAN Laurence. — Bucket brigade devices pass from principle to prototype. *Electronics*, 28 février 1972, pp. 62-63.  
BOONSTRA L., SANGSTER F.L.J. — Analogue fonctions fit neatly onto charge transport chip. *Electronics*, 28 février 1972, pp. 64-71.  
KOVAC M.G., PIKE W.S., SHOLLICROSS F.V., WEIMER P.V. — Solid state imager emerges from charge transport. *Electronics*, 28 février 1972, pp. 72-77.
- [9] THORNER K.K. — Incomplete charge transfert in IGFET bucket brigade shift register. *IEEE transactions on electron devices*, vol. ED 18, n° 10, octobre 1971.
- [10] AMELIO G.F., TOMPSETT M.F., BERTRAM W.S. — Charge coupled imaging devices design considerations. *IEEE*, vol. ED 18, n° 11, novembre 1971.
- [11] LEITH F.N. et ÚPATNIEKS S. — *J. Opt. Soc. Am.*, 54, 1295, 1964.
- [12] BROWN B.R. et LOHMANN A. — Complex Spatial Filtering with binary masks. *Applied Optics*, juin 1966, vol. 5, n° 6.
- [13] COOLEY et TUKEY J.W. — An algorithm for the machine calculation of Complex Fourier Series. *Math. Comp.*, 19, 297, 1967.

**Michel BLAMOUTIER**, né en 1923. Ingénieur ESPCI. Chef du service Tubes de prise de vue, Département Tubes et Dispositifs à Image, Thomson-CSF, 38-Saint-Egrève.

**Jean-Luc BERGER**, né en 1949. Ingénieur INP Grenoble, au Laboratoire de recherches du Département Tubes et Dispositifs à Image, Thomson-CSF, 38-Saint-Egrève.

**Daniel WCEHRN**, né en 1945. Licencié ès Sciences, diplôme de 3<sup>e</sup> cycle, ingénieur au service Tubes de prise de vue, Département Tubes et Dispositifs à Image, Thomson-CSF, 38-Saint-Egrève.